

УДК 624.012.4:666.972.165

**ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРОПРОГРЕВА БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ, ПРИГОТОВЛЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКТИВИРОВАННЫХ ЦЕМЕНТНЫХ СУСПЕНЗИЙ****канд. техн. наук, доц. А.П. ШВЕДОВ**  
(Полоцкий государственный университет)

*Анализируются режимы электропрогрева бетона в построечных условиях. Обоснован возможный интервал изменения температур и времени в процессе электропрогрева. Спланирован и проведен трехфакторный эксперимент для определения малоэнергоёмких режимов электрообработки бетона в построечных условиях. На основе экспериментальных данных определена скорость подъема температуры, максимальная температура в процессе электропрогрева и время выдержки при максимальной температуре, а также энергозатраты в процессе интенсификации твердения бетона.*

Бетонирование или усиление монолитных конструкций, определяющих темп и срок строительства и реконструкции объекта, ставит задачу разработки надежных и экономичных методов воздействия на бетон в период его твердения. Практика производства бетонных и железобетонных работ при строительстве и реконструкции зданий и сооружений показала, что основным методом интенсификации твердения бетона в построечных условиях является электротермообработка всех разновидностей. Выбор наиболее рационального метода электротермообработки зависит не только от характеристик обрабатываемой конструкции, но и от возможности применяемого метода, а также от имеющегося на стройплощадке оборудования.

**Основная часть.** С целью снижения энергозатрат при электрообработке необходимо применять методы, ускоряющие процессы гидратации цемента и структурообразования бетона, то есть активацию. Однако во всех работах для ускорения набора прочности бетона, изготовленного с применением любого вида активирования, используется тепловая обработка при помощи энергии пара, но не энергии электрического поля. Вместе с тем в литературе имеются данные, свидетельствующие о разной эффективности (к примеру, химических модификаторов) в зависимости от условий твердения. Широко распространенная противоморозная добавка поташ может использоваться совместно с паропрогревом [1], но её не рекомендуется применять в комбинации с электропрогревом бетона [2]. В этой связи большой интерес представляет вопрос о возможности использования электроактивации модифицированных цементных систем совместно с электропрогревом.

С целью определения энергосберегающих режимов электротермообработки, совместимых с активацией, область режимов электропрогрева бетона охватывала широкий интервал как скоростей подъема температуры, так и температур изотермической выдержки. При этом предварительное выдерживание длилось 2 часа, а скорость остывания поддерживалась равной 10 °С/ч.

Верхний предел изотермы для бетонов на портландцементе ограничен 80 °С. Но в ряде работ [1–5] показана возможность использования более высоких температур выдерживания – в пределах 80...90 °С. В работе [6] указывается верхний предел в 85 °С, а значение температуры 80 °С объясняется опасением возникновения перегрева из-за сложности соблюдения расчетных режимов.

Что касается модифицированных бетонов, то имеются данные [7] о выдерживании их даже при температуре, равной 98 °С.

Основываясь на этих данных, при выполнении исследований режим изотермического выдерживания принят в пределах 50...90 °С. Скорость подъема температуры варьировалась в широком диапазоне – от 5 до 20 °С/ч. Значения варьируемых факторов приведены в таблице 1.

Для описания выходных факторов применялась квадратичная модель.

**Таблица 1 – Уровни и интервалы варьирования факторов**

Факторы	Наименование факторов	Уровни фактора		
		– 1	0	+ 1
$X_1$	Скорость подъема температуры, °С/ч	5	12,5	20
$X_2$	Температура изотермического прогрева, °С	50	70	90
$X_3$	Длительность изотермического прогрева, ч	3	6,5	10

Матрица планирования эксперимента и средних значений опытов приведены в таблице 2.

В условиях каждого опыта изготавливалось по 6 образцов, 3 из которых испытывались через 4 часа после окончания электропрогрева, а 3 – по истечении 28 суток.

Таблица 2 – Матрица планирования, средние значения энергозатрат и прочности бетона

№ опыта	Факторы варьирования			Натуральные значения факторов			Прочность бетона, МПа				
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	скорость подъема температуры, °С/ч	температура изотермы, °С	длительность изотермы, ч	при использовании суспензии		стандартные условия		Энергозатраты, кВт·ч/м <sup>3</sup>
							через 4 часа после электропрогрева	через 28 суток	через 4 часа после электропрогрева	через 28 суток	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	+1	+1	0	20	90	6,5	29,12	33,6	24,96	28,48	98
2	+1	-1	0	20	50	6,5	25,6	39,36	22,72	32,96	51
3	-1	+1	0	5	90	6,5	33,6	40,32	27,52	32,64	117
4	-1	-1	0	5	50	6,5	30,08	43,52	23,68	36,16	56
5	+1	0	+1	20	70	10	29,44	38,08	24,96	28,48	85
6	+1	0	-1	20	70	3	24,96	39,36	19,2	31,04	62
7	-1	0	+1	5	70	10	33,6	41,28	27,84	32,96	96
8	-1	0	-1	5	70	3	28,8	42,24	23,04	37,12	74
9	0	+1	+1	12,5	90	10	32,96	36,16	27,52	28,48	119
10	0	+1	-1	12,5	90	3	31,04	38,4	23,68	31,36	91
11	0	-1	+1	12,5	50	10	29,76	39,68	24,0	34,88	69
12	0	-1	-1	12,5	50	3	25,28	41,6	17,6	36,16	51
13	0	0	0	12,5	70	6,5	30,72	41,92	24,96	31,36	69
14	0	0	0	12,5	70	6,5	30,4	41,28	23,04	32,64	69
15	0	0	0	12,5	70	6,5	31,04	40,96	24,0	31,04	69

Одновременно изготавливались образцы с использованием суперпластификатора С-3 и ускорителя твердения (сульфата натрия) по существующей технологии, которые использовались для определения эффективности нового технологического решения.

Расчет коэффициентов модели, дисперсии воспроизводимости, дисперсии параметров модели, доверительные интервалы параметров модели производились по методике, приведенной в работах [8–10] с использованием критериев Стьюдента, Пирсона, Фишера. В результате соответствующей обработки экспериментальных данных получены следующие виды моделей прочности бетона в зависимости от режимов электропрогрева и времени испытания:

$$\bar{R}_s^a = 31 - 2,1X_1 + 2X_2 + 2X_3 - 0,6X_2X_3 - 0,8X_1^2 - 0,3X_2^2 - 0,7X_3^2, \quad (1)$$

$$\bar{R}_s^{a28} = 41 - 2X_1 - 2X_2 - 0,8X_3 - 0,6X_1X_2 - 0,5X_1^2 - 1,7X_2^2 - 0,7X_3^2, \quad (2)$$

$$\bar{R}_s = 24 - 1,3X_1 + 2X_2 + 2,6X_3 - 0,4X_1X_2 - 0,6X_2X_3 + 0,6X_1^2 - 0,9X_3^2, \quad (3)$$

$$\bar{R}_s^{28} = 32 - 2,2X_1 - 2,4X_2 - 1,4X_3 + 0,4X_1X_3 - 0,4X_2X_3 + 0,6X_2^2 + 0,4X_3^2. \quad (4)$$

Для определения координат оптимума находим частные производные и приравниваем их к нулю:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\bar{R}_s^a}{dX_1} &= -2,1 - 1,6X_1 = 0 \\ \frac{d\bar{R}_s^a}{dX_2} &= 2 - 0,6X_3 - 0,6X_2 = 0 \\ \frac{d\bar{R}_s^a}{dX_3} &= 2 - 0,6X_2 - 1,4X_3 = 0 \end{aligned} \right\} I$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\bar{R}_s^{a28}}{dX_1} &= -2 - 0,6X_2 - X_1 = 0 \\ \frac{d\bar{R}_s^{a28}}{dX_2} &= -2 - 0,6X_1 - 3,4X_2 = 0 \\ \frac{d\bar{R}_s^{a28}}{dX_3} &= -0,8 - 1,4X_3 = 0 \end{aligned} \right\} II$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\bar{R}_e}{dX_1} &= -1,3 - 0,4X_2 + 1,2X_3 = 0 \\ \frac{d\bar{R}_e}{dX_2} &= 2 - 0,4X_1 - 0,6X_3 = 0 \\ \frac{d\bar{R}_e}{dX_3} &= 2,6 - 0,6X_2 - 1,8X_3 = 0 \end{aligned} \right\} III$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dR_e^{28}}{dX_1} &= -2,2 + 0,4X_3 = 0 \\ \frac{dR_e^{28}}{dX_2} &= -2,4 - 0,4X_3 + 1,2X_2 = 0 \\ \frac{dR_e^{28}}{dX_3} &= -1,4 + 0,4X_1 - 0,4X_2 + 0,8X_3 = 0 \end{aligned} \right\} IV$$

Решение четырех систем уравнений представлено в таблице 3.

Таблица 3 – Координаты экстремальных точек электропрогрева бетона

Факторы	Бетон с активированной цементной суспензией				Бетон для сравнения			
	через 4 часа после электропрогрева		через 28 суток после электропрогрева		через 4 часа после электропрогрева		через 28 суток после электропрогрева	
	нормализованный масштаб	натуральный масштаб	нормализованный масштаб	натуральный масштаб	нормализованный масштаб	натуральный масштаб	нормализованный масштаб	натуральный масштаб
$X_1$	1,31	2,68	-1,84	-1,3	-2,42	-5,65	-3,68	-15,1
$X_2$	0	70	-0,263	64,74	-10,5	-140	3,83	146,6
$X_3$	3,33	18,15	-0,57	4,5	4,93	23,8	5,5	25,75

Как видно из таблицы 3, в рассматриваемой области экстремальной точки нет.

На рисунках 1 и 2 приведены результаты моделирования изменения прочности бетона с использованием активированных цементных суспензий и без них в зависимости от различных факторов.

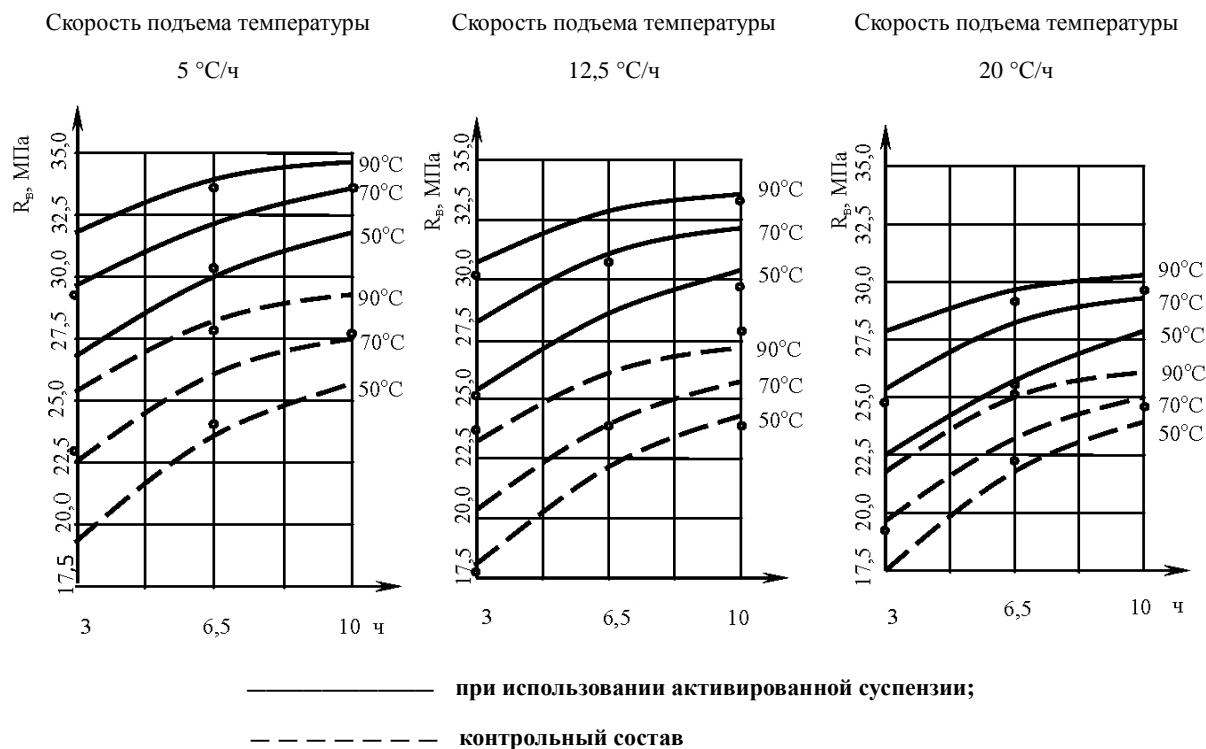


Рисунок 1 – Прочность бетона на сжатие через 4 часа после электропрогрева, при различной скорости подъема температуры и различной температуре изотермического прогрева, в зависимости от длительности изотермического выдерживания

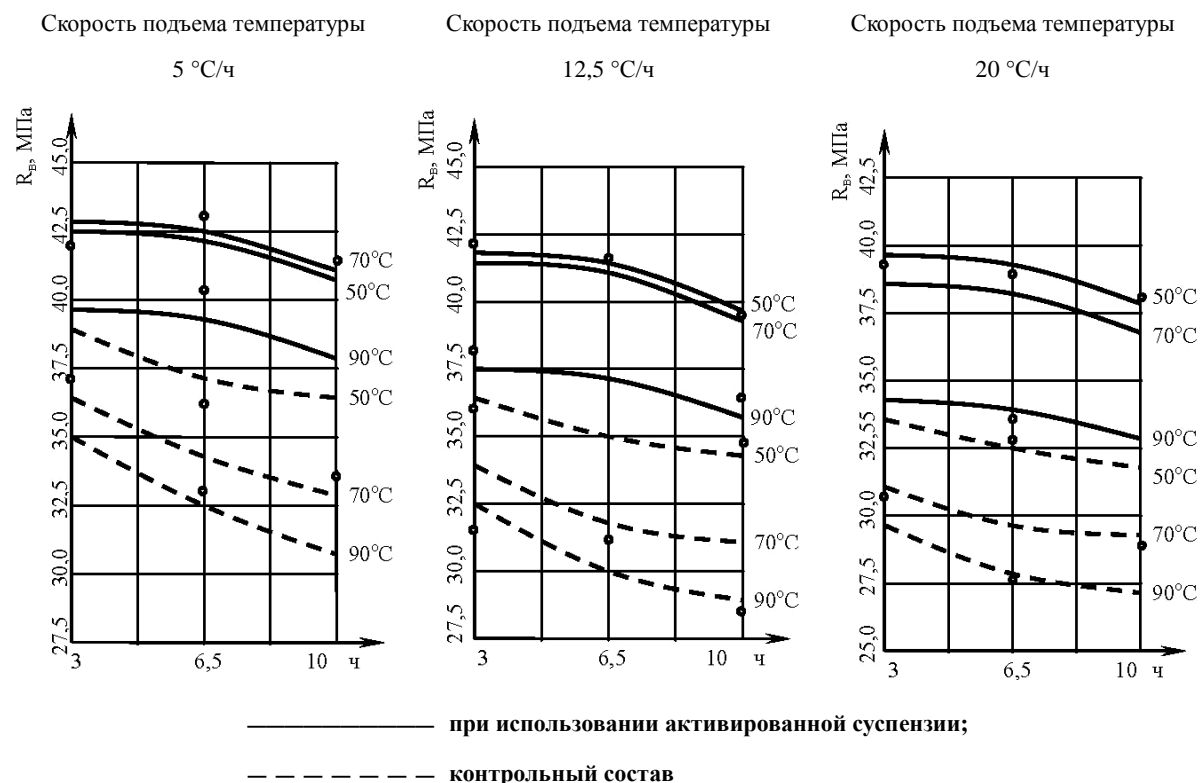


Рисунок 2 – Прочность бетона на сжатие через 28 суток после электропрогрева, при различной скорости подъема температуры и различной температуре изотермического прогрева, в зависимости от длительности изотермического выдерживания

Статический анализ моделей (1), (2), (3), (4) представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Проверка адекватности моделей

Номер модели	Погрешность эксперимента	Остаточная сумма квадратов	Число степеней свободы	Дисперсия адекватности	Расчетное значение F-критерия Фишера	Табличное значение F-критерия Фишера	Вывод
(1)	0,1024	2,816	5	0,5632	5,5	19,3	адекватна
(2)	0,239	6,5643	5	1,3129	5,49	19,3	адекватна
(3)	0,9216	4,9936	5	0,9987	1,08	19,3	адекватна
(4)	0,7168	5,696	5	1,1392	1,59	19,3	адекватна

Анализ результатов проведенных экспериментов свидетельствует о том, что для бетонов, содержащих и не содержащих активированную цементную суспензию, влияние электропрогрева, оказываемое на прочность бетона, различно.

Влияние на прочность бетона, испытанного для сравнения через 4 часа после электропрогрева, выражается в том, что с увеличением времени и температуры изотермического выдерживания прочность увеличивается. Однако интенсивность набора прочности при всех температурах уменьшается при увеличении времени изотермы. Также с увеличением скорости подъема температуры прочность при всех температурах изотермы снижается и при увеличении продолжительности изотерм происходит сближение результатов.

Для бетонов 28-суточного возраста явно выражена тенденция снижения прочности с повышением температуры изотермической выдержки. Причем после 6...7 часов изотермического прогрева скорость снижения прочности уменьшается. Также для всех скоростей подъема температуры разность в прочности образцов, выдержанных при 50 и 70 °C, намного больше разности в прочности между образцами, выдер-

жанными при 70 и 90 °С. Это означает, что для получения большей прочности бетонов 28-суточного возраста необходимы низкотемпературные изотермы.

Однозначно виден факт, что наибольшая прочность достигается при малых скоростях подъема температуры в сочетании с низкой температурой изотермического выдерживания и малой ее продолжительностью. Аналогично наименьшая прочность получается при больших скоростях подъема температуры в сочетании с высокой температурой изотермического выдерживания и большой продолжительностью.

Для бетонов с использованием активированной цементной суспензии и испытанных через 4 часа после электропрогрева характерным является то, что чем больше температура изотермической выдержки, тем выше их прочность. Но с увеличением продолжительности изотермического выдерживания прочностные показатели во всем интервале температур сближаются. При температуре изотермической выдержки 90 °С после 6,5 часов независимо от скорости подъема прочность практически не увеличивается.

Можно отметить и то, что независимо от температуры изотермического выдерживания с увеличением скорости подъема температуры прочность бетона уменьшается.

При мягких режимах электропрогрева, то есть скорость подъема температуры составляет 5 °С/ч, через 6,5 часов изотермического выдерживания при температуре 50 °С прочность бетона такая же, как и при скорости подъема 12,5 °С/ч и продолжительности изотермического выдерживания 5 часов при температуре 70 °С. При скорости подъема температуры 12,5 °С/ч и 5 часов изотермического выдерживания при температуре 50 °С прочность одинакова с режимом выдерживания при скорости подъема температуры 20 °С/ч, изотерме 70 °С и длительности 5,5 часов.

Это имеет принципиальное значение, особенно для условий строительной площадки, так как для скорости подъема температуры 12,5 °С/ч необходимая мощность в три раза больше, чем для скорости подъема 5 °С/ч, и в 1,5 раза больше при скорости подъема 20 °С/ч по сравнению с 12,5 °С/ч. Так как на стройплощадке мощности обычно ограничены, то для производства работ по устройству монолитных конструкций более предпочтительны будут малые скорости подъема температуры.

Для бетонов, полученных с использованием активированной цементной суспензии в 28-суточном возрасте, характерным является уменьшение прочности при увеличении как температуры изотермической выдержки, так и скорости подъема температуры. Причем при малых скоростях подъема, составляющих 5 °С/ч, прочности бетона, выдержанного при 50 и 70 °С, сопоставимы, а далее разрыв увеличивается. Особенно большое расхождение в прочности бетона, выдержанного при 70 и 90 °С.

При всех скоростях подъема температуры и любой температуре изотермического выдерживания прочность бетона практически не изменяется при длительности изотермического выдерживания до 6,5 часов, но в последующем идет резкий ее спад с увеличением длительности. Это является наиболее существенным отличием в прочности бетонов, содержащих и не содержащих активированную цементную суспензию.

Снижение прочности бетона касается в особенности образцов, выдержанных при температуре 90 °С, причем при любой длительности изотермического выдерживания. Поэтому, очевидно, не следует использовать выдержку бетона при температуре свыше 70 °С.

При всех скоростях подъема температуры характер снижения прочности в зависимости от длительности изотермы практически одинаков и не зависит от скорости подъема температуры.

В основном нет больших отличий в характере изменения прочности при электропрогреве бетонов, приготовленных с использованием активированной суспензии и без нее. Как и при естественном твердении, сохраняется увеличение прочности бетона с активированной цементной суспензией по сравнению с бетонами без нее на 15...20%.

Анализ влияния продолжительности электропрогрева позволяет сделать вывод о том, что до 6,5 часов изотермического выдерживания показатели интенсивности нарастания прочности бетона близки у всех составов. После 6,5 часов у бетонов с активированной цементной суспензией наблюдается уменьшение скорости набора прочности. Причем такое уменьшение связано со скоростью подъема температуры и температурой изотермической выдержки. При температуре изотермы 50 °С скорость набора прочности при всех режимах практически не изменяется. При изотерме 70 °С интенсивность набора прочности неизменна только при скорости подъема температуры 5 °С/ч, при других скоростях подъема температуры после 6,5 часов интенсивность набора прочности резко убывает. Для изотермы 90 °С независимо от скорости подъема температуры после 6,5 часов выдержки интенсивность набора прочности резко уменьшается.

Для бетонов, не содержащих активированную цементную суспензию, уменьшение интенсивности набора прочности характерно только во время его изотермической выдержки при температуре 90 °С. Это может свидетельствовать о более интенсивных процессах структурообразования у бетонов, содержащих активированную цементную суспензию.

Для бетонов, изготовленных на электроактивированных суспензиях с применением электропрогрева и выдержанных 28 суток, однозначно просматривается тенденция в ограничении длительности изотермического прогрева, составляющей 6,5 часов, так как при большей его длительности независимо

от режимов наблюдается увеличивающийся недобор прочности. В случае отсутствия активированной суспензии однозначно определяется тенденция недобора прочности при увеличении длительности изотермического выдерживания. Это ещё один косвенный показатель того, что активированная часть цемента способствует на начальной стадии формированию более прочных структур, которые выдерживают температурные деформации.

**Заключение.** При применении для интенсификации твердения электропрогрева максимальная прочность бетона, приготовленного с использованием активированной цементной суспензии, достигается при мягких режимах проведения процесса, то есть при небольшой скорости подъема температуры, равной 5...12 °С/ч. С увеличением температуры изотермического прогрева свыше 50 °С прочность электроактивированного бетона в 28-суточном возрасте, как правило, снижается.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Миронов, С.А. Теория и методы зимнего бетонирования / С.А. Миронов. – М.: Стройиздат, 1975. – 699 с.
2. Бетонные и железобетонные работы. Справочник строителя / под общ. ред. В.Д. Топчия. – М.: Стройиздат, 1980. – 200 с.
3. Абрамов, В.С. Электротермообработка бетона / В.С. Абрамов, Н.М. Данилов, Б.М. Красновский. – М.: Госстройиздат, 1975. – 165 с.
4. Волосян, Л.Я. Тепло- и массообмен при термообработке бетонных и железобетонных изделий / Л.Я. Волосян. – Минск: Наука и техника, 1973. – 255 с.
5. Крылов, Б.А. Особенности возведения монолитных конструкций при отрицательных температурах / Б.А. Крылов, В.П. Филатов // Бетон и железобетон. – 1985. – № 3. – С. 4–5.
6. Хаютин, Ю.Г. Монолитный бетон / Ю.Г. Хаютин. – М.: Стройиздат, 1991. – 576 с.
7. Влияние обработки цементных суспензий на ускоренное твердение бетона / И.М. Грушко [и др.] // Бетон и железобетон. – 1981. – № 3. – С. 38–40.
8. Ящерицын, П.И. Планирование эксперимента в машиностроении / П.И. Ящерицын, Е.И. Махаринский. – Минск: Выш. шк., 1985. – 286 с.
9. Руководство по подбору составов тяжелого бетона / НИИЖБ Госстроя СССР. – М., 1979. – 103 с.
10. Баженов, Ю.М. Перспективы применения математических методов в технологии сборного железобетона / Ю.М. Баженов, В.А. Вознесенский. – М.: Стройиздат, 1974. – 181 с.

Поступила 03.12.2015

#### ENERGY-SAVING MODES OF WARMING UP OF CONCRETE MIXTURES PREPARED BY USING ACTIVATED CEMENT SLURRIES

A. SHVEDOV

*The analysis of the modes of warming up of concrete in construction conditions. Proved possible interval of change of temperature and time in the process of warming up. Planned and executed three-factor experiment to determine the low-energy modes allows concrete built conditions. On the basis of experimental data, the speed of an early Wake-up temperature, the maximum temperature in the process of warming up and holding time at maximum temperature, and techenergосervice in the process of intensification of concrete hardening.*